第46卷 第2期
2023年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 2
Feb. 2023

甘肃省绿色发展效率时空演化与驱动因素研究

鹿晨昱[1,2]， 黄 萍[1]， 张 彤[1]， 刘小莞[2]， 成 薇[1]

（1. 西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070；
2. 兰州交通大学建筑与城市规划学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：提升绿色发展效率对甘肃省生态文明建设、高质量发展至关重要。采用Super-SBM模型、热点分析和地理探测器分析2005—2019年甘肃省14个市州绿色发展效率时空演化特征及其驱动因素。结果表明：(1) 时序上，绿色发展效率总体呈“M”型波动趋势，区域相对差异亦表现出相应的波动趋势。(2) 空间上，绿色发展效率空间分异性显著，南北方向梯度差明显大于东西方向。空间集聚程度弱，以低热点区、中热点区和低冷点区为主，存在俱乐部收敛特征。(3) 市场化水平、创新能力、政府调控、城镇化水平是绿色发展效率空间分异的主导因子。甘肃省绿色发展效率是多因子交互作用的结果。研究结果在丰富城市绿色发展指标体系和研究案例的同时，对甘肃省及其他欠发达地区绿色转型发展提供借鉴。

关 键 词：绿色发展效率；Super-SBM模型；地理探测器；甘肃省

文章编号：1000－6060(2023)02－0305－11(0305～0315)

进入21世纪，人类社会进入绿色工业革命，发展模式将从“黑色发展模式”转向全面的“绿色发展模式”[1]。中国改革开放40多年，经济建设取得辉煌成就，工业化、城镇化水平显著提升，与此同时社会经济高质量发展也受到资源和环境问题的制约[2-3]。为此，2005年习近平同志提出“绿水青山就是金山银山”发展理念，绿色发展模式迅速兴起[4]。2015年5月5日，中共中央国务院《关于加快推进生态文明建设的意见》提出坚持把“绿色发展、循环发展、低碳发展”作为基本途径[5]。十九大报告指出要加快生态文明体制改革，推进绿色发展。“十四五”规划和2035年远景目标纲要进一步指出要构建生态文明体系，推动经济社会发展全面绿色转型。因此，推动区域绿色发展不仅是解决区域自身发展问题，更是落实国家战略的必然要求。

绿色发展的核心理念是循环、低碳、可持续，其关键之处在于提升绿色发展效率。绿色发展效率研究受国内外学者广泛关注，主要方面如下：(1) 区域选择，当前的研究主要集中全球[6]、国家[7]、城市群[8]、城市[9]、流域[10]等区域。(2) 评价体系构建与研究方法选择，绿色发展效率测度指标体系主要基于绿色发展可持续发展理论[7]、“三圈系统”理论[9]、包容性发展理论[11]等构建。研究方法具体采用投影寻踪模型法[7]、熵值法[12]和投入产出法[13]等进行量化。近年来，基于投入产出分析方法的绿色发展效率评价，构建人力、资本、科技与资源要素的投入以及经济效益、社会效益、生态效益等期望产出和考虑环境成本的非期望产出呈现出明显优势，学者对此展开较多工作[14-15]。(3) 作用机理方面，探索区域绿色发展效率影响机理是“知其所以然”，有助于把握绿色发展问题的根源。根据“地理学第一定律”，多运用空间杜宾模型[14]、地理加权回归[16]、系统广义矩估计[17]等方法，分析环境监管[18]、产业结构调整[19]、市场配置[20]等驱动因素对绿色发展的影响。

总结可知，已有文献研究尺度与研究方法更加多维化与多元化，但对绿色发展潜在需求大及具有后发优势的欠发达地区绿色发展效率研究较少。甘肃省虽为“一带一路”建设的黄金节点，黄河流域高质量发展、国家西部生态安全屏障的重要省份，但内生比较优势不足，亟需以绿色发展倒逼区域发

收稿日期：2022-04-25； **修订日期：**2022-05-20
基金项目：国家自然科学基金项目(42061054,41561110)；甘肃省科技计划项目(20CX4ZA039,21JR1RA234)资助
作者简介：鹿晨昱(1981-)，男，副教授，主要从事人地关系与区域可持续发展等方面的研究. E-mail: lcy19810507@163.com

展模式转变;第四届"甘肃·祁连山高峰论坛"提出围绕"融智陇原,绿色蝶变",寻求新形势下甘肃省绿色发展的新路径,那么如何实现"有所为有所不为"努力打造美丽中国的"甘肃省样板"?为此,本文基于甘肃省区域特征构建甘肃特色和区域普适性绿色发展效率指标体系,运用Super-SBM模型测算14个市州绿色发展效率,刻画其时空演化特征,并运用地理探测器构建绿色发展效率驱动因素模型,在丰富城市绿色发展效率指标体系和研究案例的同时,以期为甘肃省及其他欠发达地区绿色转型发展提供借鉴。

1 研究区概况

甘肃省(32°11′~42°57′N,92°13′~108°46′E),省域面积约42.59×10⁴ km²,占国土面积的4.7%,省会兰州市,下辖12个地级市、2个自治州(图1)。甘肃省连接中原与新疆、青海、宁夏和内蒙古,是黄河、长江上游重要的补给区,其战略地位突出。在自然环境方面,甘肃省地处三大高原和三大自然区交汇地带,地域分异特征显著,划分为五大地理区,其生态功能重要,生态脆弱,生态环境敏感[21]。在人文环境方面,截至2019年,甘肃省人口2647.433×10⁴人,GDP总量达到8718.3×10⁸元,全国排名第27位。



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3266号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch map showing the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

基于绿色发展"三圈系统"理论,参考国家发展改革委员会印发的《绿色发展指标体系》,遵循数据可获得性、科学性、客观性、系统一致性原则,建立甘肃省绿色发展效率投入产出指标体系(表1)。投入方面,资本投入因折旧率和基期资本存量各异,

表1 甘肃省绿色发展效率评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of green development efficiency in Gansu Province

一级指标		二级指标	三级指标	单位
投入	资本要素	–	全社会固定资产投资总额	10^8元
	劳动力要素	单位从业人数	年末实际就业人员数	10^4人
	技术要素	–	R&D人员全时当量	人·a^{-1}
	资源要素	水、土、能源消费总量	建成区面积	km^2
			供水总量	$10^4 m^3$
			全社会用电量	10^4 kWh
			人工和天然气供气量	$10^4 m^3$
			液化石油气供应量	t
产出	期望产出	经济效益	地区实际GDP(2005年不变价)	10^8元
		社会效益	城镇居民人均可支配收入	元
			社会消费品零售总额	10^8元
		环境效益	绿地覆盖率	%
			生活垃圾无害化处理率	%
	非期望产出	环境污染	工业废气排放量	10^4 t
			工业废水排放量	10^4 t
			化肥折纯量	10^4 t

借鉴史玉芳等[22]选取全社会固定资产投资总额表征。劳动力投入、科技投入、资源投入分别由各市州年末实际就业人员数[23]、R&D人员全时当量[16]、资源投入综合指数[22]进行表征。期望产出方面，经济效益由2005年不变价格[15]的实际GDP进行表征。社会产出由社会效益指数综合反映。环境效益反映环境"好"的产出，由环境效益指数表征[9]。非期望产出方面，由环境污染指数表征，考虑到甘肃省为农业大省，化肥对环境有较大影响，参考林晓等[24]将化肥折纯量考虑入内。资源投入综合指数、社会效益指数、环境效益指数、环境污染指数均通过熵值法综合计算得出。数据主要来源于《中国城市统计年鉴》《甘肃发展统计年鉴》及各市州地区统计年鉴和统计公报。对于部分缺失的数据通过插值法进行填补。

2.2 研究方法

2.2.1 Super-SBM模型（Super slacks-based model） Super-SBM模型[25]，相较于传统DEA模型，考虑要素的"松弛"影响，能够有效解决忽略非期望产出而导致绿色发展效率评价结果偏差的问题，同时又能弥补传统SBM多个为1的有效决策单元不能有效排序和区分的缺陷。而传统资源、劳动力、资本及科学技术等要素投入，除产生期望产出外，还可能产生环境污染等非期望产出，故Super-SBM模型能真实反映甘肃省绿色发展效率的本质。具体公式如下[14]：

$$\omega = \min \frac{\frac{1}{m}\sum_{s=1}^{m}\frac{\bar{x}_s}{x_{sk}}}{\frac{1}{r_1+r_2}\left(\sum_{d=1}^{r_1}\frac{\bar{y}_d^q}{y_{dk}^q}+\sum_{i=1}^{r_2}\frac{\bar{z}_i^u}{z_{ik}^u}\right)} \tag{1}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases} \bar{x} \geqslant \sum_{j=1,\neq k}^{n}\theta_j x_j \\ \bar{y}^q \leqslant \sum_{j=1,\neq k}^{n}\theta_j y_j^q \\ \bar{z}^u \geqslant \sum_{j=1,\neq k}^{n}\theta_j z_j^u \\ \sum_{j=1,\neq k}^{n}\theta_j = 1 \\ \bar{x} \geqslant x_k, \bar{y}^q \leqslant y_k^q, \bar{z}^u \geqslant z_k^u, \bar{y}^q \geqslant 0, \theta_j \geqslant 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中：ω为绿色发展效率值；x、y^q、z^u分别为投入、期望产出和非期望产出要素；m、r_1和r_2分别为投入、期望产出和非期望产出个数；$\bar{x}$、$\bar{y}^q$、$\bar{z}^u$分别为投入、期望产出、非期望产出的松弛变量；k为生产时期；n为决策单元数；s、d、i分别为投入、期望产出和非期望产出的决策单元；θ_j为权重向量。

2.2.2 冷热点分析（Getis-Ord G_i^*） Getis-Ord G_i^*指数用于局部空间相关性分析，可以识别甘肃省不同城市空间集聚情况，反映绿色发展效率的空间依赖性和异质性。具体测算公式如下[26]：

$$G_i^*(d) = \frac{\sum \lambda_{ij} X_j}{\sum X_j} \tag{3}$$

式中：X_j为空间单元j的绿色发展效率值；d为临界距离；λ_{ij}为空间权重。对于$G_i^*(d)$需进行Z检验，Z显著为正，表示该空间单元是高值集聚区，属于绿色发展热点区，反之聚类值低，为冷点区。

2.2.3 地理探测器模型 地理探测器[27]通过一组统计学方法解释要素空间分异的背后驱动力，同时探测两因子交互作用对要素的解释力，当样本量小于30时，相较于经典回归更加可靠。其可以分析定量数据也可以探测定性数据，被广泛运用于生态环境变化以及社会经济发展等方面。公式如下：

$$q = 1 - \frac{1}{m\varphi^2}\sum_{i=1}^{r} m_i \varphi_i^2 \tag{4}$$

式中：q为解释力；m、φ^2为样本量和方差；r为探测因子数；m_i和φ_i^2分别为i(i=1, 2, ⋯, n)的层样本量和方差。q值介于0~1之间，值越大，解释力越强。

3 结果与分析

3.1 甘肃省绿色发展效率时空分异特征

本文采用DEA-SOLVERPRO 5.0软件，选择投入导向、不变规模报酬假定下超效率SBM模型（SBM-I-C），对甘肃省绿色发展效率（Green development efficiency, GDE）进行测算。

3.1.1 甘肃省绿色发展效率时序演变特征 通过分析甘肃省GDE的平均值、变异系数发现（图2）：2005—2019年GDE总体呈现"上升-下降-上升-下降"的"M"型波动趋势，这与周亮等[9]研究中国城市GDE演变趋势相反，变异系数表现出相应的"M"波动趋势，具有四阶段变化特征。具体表现为：2005—2008年GDE上升，变异系数波动上升。此阶段中国加入世贸组织，国际贸易合作逐步加深，甘肃省受到辐射影响，技术生产条件改善，资源配置效率提高，GDE不断上升。此外正值中国"十一五"

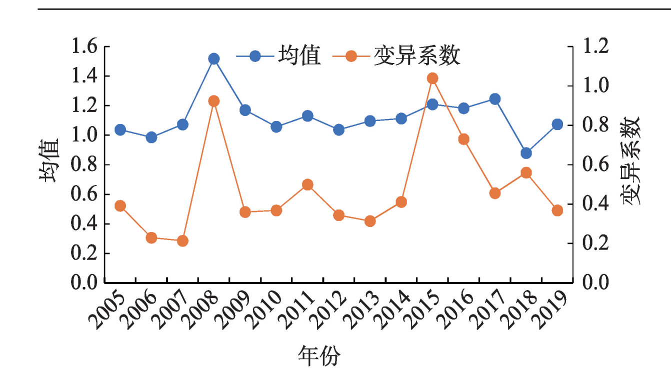


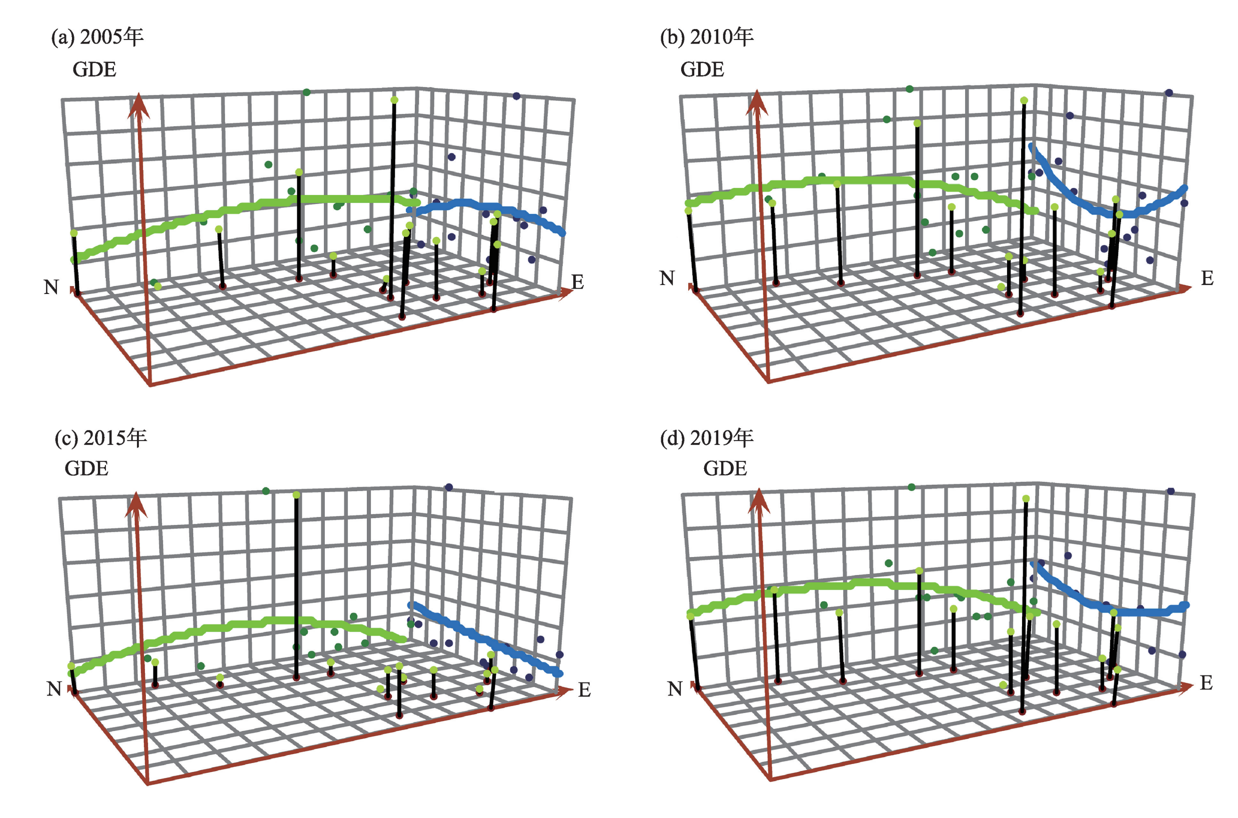
图2 2005—2019年甘肃省绿色发展效率时间演变

Fig. 2 Temporal evolution of GDE in Gansu Province from 2005 to 2019

规划时期，GDE上升，而各地环境规制和资源配置效率各异，区域相对差异波动上升。2009—2012年GDE波动下降，变异系数相应波动下降。金融危机影响下，GDE迅速下降，但甘肃省各市州积极应对，淘汰落后产能，投资新兴技术产业，GDE降幅得到控制，区域相对差异亦波动下降。2013—2015年GDE缓慢上升，而变异系数大幅上升。可能是由于“五位一体”发展战略实施，GDE有所上升，但甘肃省位于西部地区，基础较弱，以发展经济为主，承接了东部大量产业转移，GDE增幅较小。而各地经济发展水平、资本投入各异，对生态文明建设重视程度不一，区域相对差异大幅增长。2016—2019年GDE波动下降，变异系数波动下降。2016年后，随着“十三五”节能减排的推进，甘肃省筑起国家生态安全屏障，坚持生态优先、绿色发展，但由于政策的滞后性，效率的提升不会迅速反映到当年。低效率市州对高效率市州存在明显追赶效应，区域相对差异波动下降。

3.1.2 甘肃省绿色发展效率空间分异特征 借助ArcGIS软件，选取2005、2010、2015、2019年研究区GDE值绘制全局趋势图（图3a~d），并用自然断点法绘制空间格局图（图4a~d），探索甘肃省GDE的空间分布特征。

由图3a~d，趋势线呈明显的倾斜或弯曲，说明甘肃省GDE空间分异性显著。2005年南北方向和东西方向均呈倒“U”型；2010年呈西高东低、南北高中间低特征；2015年东西方向与南北方向差异均明显缩小，总体相对均衡；2019年东西方向差距再次



注：GDE为绿色发展效率；绿线和蓝线分别表示从东西向和南北向拟合GDE值的地域分异；黑色竖线表示不同市州的GDE值。下同。

图3 甘肃省绿色发展效率空间格局变化趋势线

Fig. 3 Trends of spatial patterns of GDE in Gansu Province

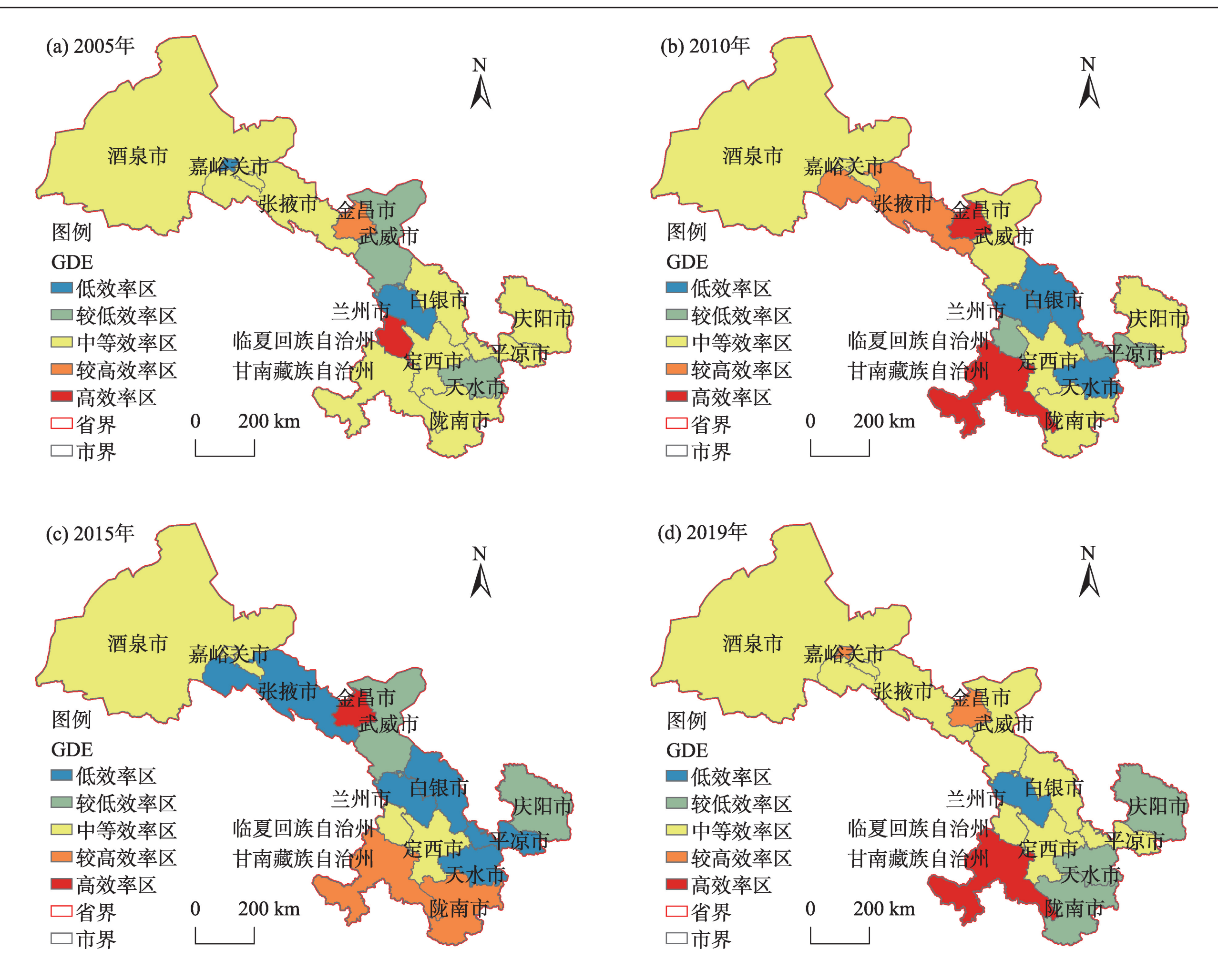


图4　甘肃省绿色发展效率空间分异

Fig. 4　Spatial differentiation of GDE in Gansu Province

扩大，形成西高东低的梯度格局，中部地区效率略升，形成南北高中间低的格局。相比而言，南北方向梯度差明显大于东西方向，表明缩小南北方向GDE差异仍然是未来政策调控的重点。

从不同效率区域空间演化类型分析，整体而言，中等效率区占比最高；较高效率区数量增加，占比上升；低效率区占比降低，说明甘肃省GDE得到改善，但并未发生根本性改变。从城市层面分析，经济状况好的兰州市GDE最低，这与李晋红等[28]的研究结果基本相符，说明经济发展和生态建设在实质上并未形成协调共生的良性循环，经济发展方式较粗放，环境问题凸显。金昌市、张掖市、嘉峪关市GDE呈上升趋势，十大绿色生态产业发展取得一定成效。甘南藏族自治州、临夏回族自治州、陇南市效率相对较高，主要发展农业、畜牧业和旅游业，其付出的环境代价较小。

为进一步揭示GDE空间集聚特征及演变规律，采用Getis-Ord G_i^*指数对2005、2010、2015、2019年效率值进行可视化分析（图5a~d）。

总体而言，甘肃省GDE空间集聚特征显著性弱，显著区域以低热点区、中热点区和低冷点区为主。随时间演进，大部分区域保持着原有格局。从冷热点空间分布来看，由于区位条件和以农业和畜牧业为主的产业结构，付出的环境代价少，于2005年与2019年形成以甘南藏族自治州为核心的低热点区，GDE存在俱乐部收敛特征。2010年形成以兰州市和白银市为中心的低冷点区，其经济发展投入高，环境代价大反映出提升GDE需提高资源配置效率。2015年形成以金昌市、武威市为中心的中热点区，以重工业为主，其产业结构调整促进GDE提升。

3.2　甘肃省绿色发展效率时空分异的驱动因素识别

甘肃省GDE的时空演变特征体现其发展不平衡。本文构建甘肃省GDE驱动因素模型，利用地理

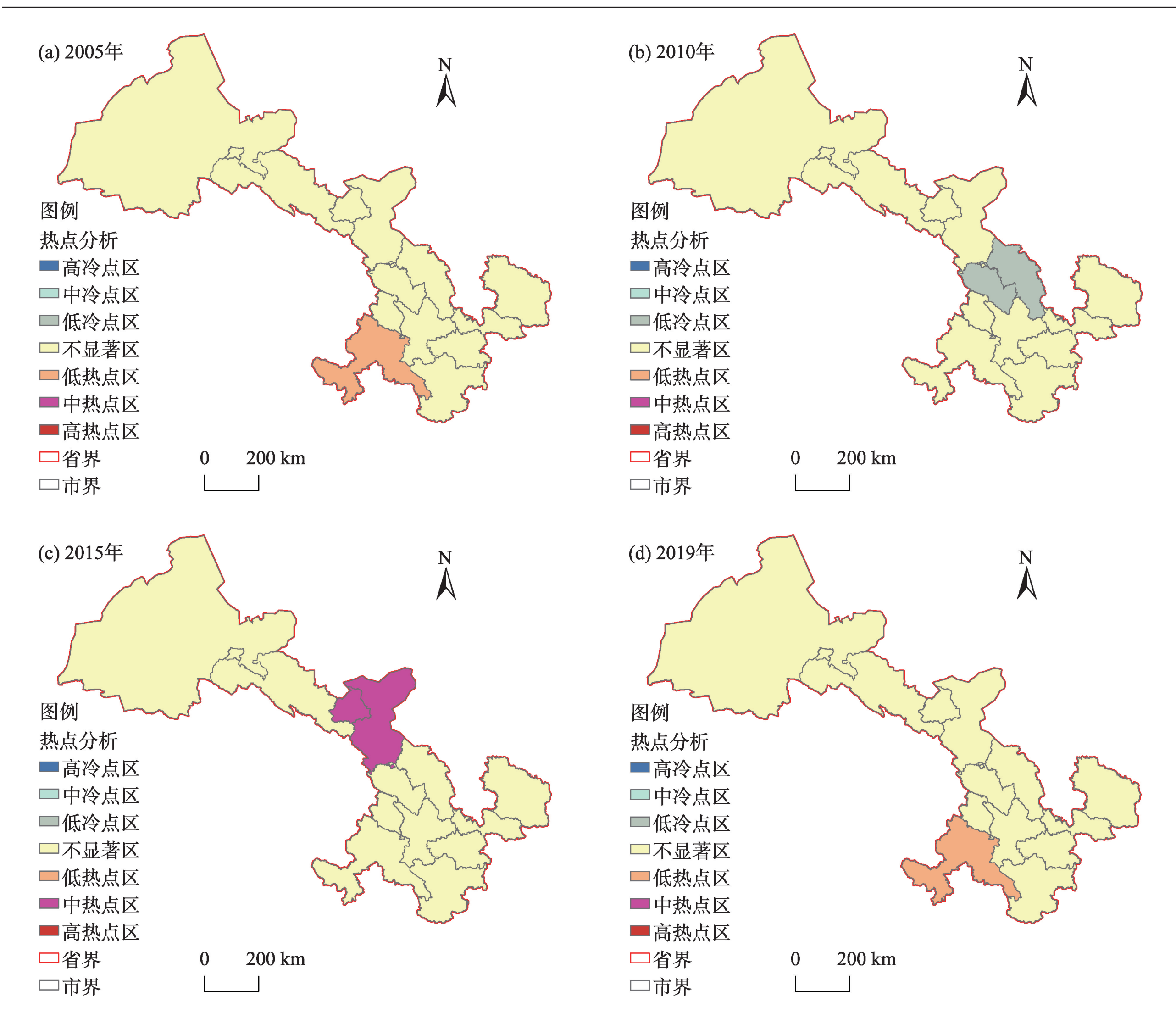


图5 甘肃省绿色发展效率空间集聚特征

Fig. 5 Spatial agglomeration characteristics of GDE in Gansu Province

探测器对其空间分异的主导因子及其交互作用进行考察。

3.2.1 驱动因子选取 借鉴相关研究成果[7,10,12,14,23,29-30]，结合甘肃省GDE“过程-格局”特征，受数据可得性的限制，选取城镇化水平、产业结构、政府调控、贸易水平、市场化水平、创新能力、人口密度验证影响甘肃省GDE的驱动因素。分别选取城镇人口占区域总人口的比例、第二产业产值占第三产业产值的比重、财政支出占GDP比重、各城市的进出口商品总值占GDP比重、除国有和集体外其他所有制在岗人员比重、科学技术与教育支出之和占GDP比重、单位国土面积的人口数量表征。

3.2.2 绿色发展效率空间分异探测结果分析 借助于ArcGIS软件，首先对数值型变量离散化处理为类型变量，再利用地理探测模型测算。

（1）绿色发展效率空间分异主导因素识别

利用因子探测（表2）发现解释力（q）除2005年政府调控与创新能力不显著，其他均通过了1%水平显著性检验。综合来看，市场化水平、创新能力、政府调控、城镇化水平为主导因子，其q均值均大于0.43。贸易水平、人口密度、产业结构相对较弱；其中城镇化水平、政府调控和创新能力对未来GDE空间分异的影响潜力大，其q在2019年分别达到0.536、0.561和0.935；随着时间演变，政府调控、创新能力q呈上升趋势，贸易水平、市场化水平和人口密度q呈下降趋势。

市场化水平的q最强，市场化水平通过市场竞争机制、价格互馈机制、供需平衡机制、风险预警机制等实现资源要素的高效率配置，甘肃省充分发挥市场化对GDE的提升，但市场化水平相对较低，提

表2 甘肃省绿色发展效率空间分异因子探测结果

Tab. 2 Factor detection results of spatial differentiation of GDE in Gansu Province

探测因子	2005年		2010年		2015年		2019年		均值	
	q	排序	q	排序	q	排序	q	排序	q	排序
城镇化水平(X_1)	0.171***	4	0.563***	4	0.449***	5	0.536***	3	0.430	4
产业结构(X_2)	0.112***	5	0.572***	3	0.511***	3	0.291***	5	0.371	7
政府调控(X_3)	0.007	7	0.270***	6	0.467***	4	0.561***	2	0.433	3
贸易水平(X_4)	0.248***	3	0.393***	5	0.837***	1	0.178***	7	0.414	5
市场化水平(X_5)	0.804***	1	0.596***	2	0.610***	2	0.206***	6	0.554	1
创新能力(X_6)	0.014	6	0.262***	7	0.196***	7	0.935***	1	0.464	2
人口密度(X_7)	0.470***	2	0.639***	1	0.207***	6	0.293***	4	0.402	6

注：q为解释力。***表示P<0.01。下同。

升能力有限。

创新能力方面，清洁生产技术、资源效率提升技术和污染控制技术能够促进资源高效利用和环境污染的控制治理，提高投入产出效率，增强环境治理效果。甘肃省作为西北内陆地区，人才外流现象较为明显，科技创新能力不足。同时也验证了周亮等[9]提出的技术创新"倒逼机制"尚未形成。

政府调控方面，地方财政有自上而下"指令性"发展特征，发挥政策倾斜红利作用，有利于促进生态补偿和生态建设，建设甘肃省西部生态安全屏障。

城镇化水平方面，甘肃省的城镇化水平不断上升，经济社会发展福利提升，生态文明理念与绿色发展需求增强，能够推动政府强化和完善环境治理制度体系，促进环境治理能力提高；另一方面，城镇化发展的要素集聚效应和空间溢出效应，协同整合产业和企业，降低生产过程成本，提高投入产出效率，推动产业链条的重塑和优化、产业转型升级，GDE上升。

贸易水平方面，甘肃省处于西北内陆地区，基础弱，进出口贸易产生环境溢出效应，使区域可持续发展理念、绿色技术、生态文化理念逐步扩散，可持续发展机制和先进的环境治理制度在一定程度上促进甘肃省GDE的快速提高，但同时需要警惕在招商引资竞争压力下，降低外资企业环境准入门槛，带来的资源环境问题将制约GDE的提升。

人口密度q较弱且呈下降趋势。人口密度将对区域生态保护、资源利用和环境质量施加压力，降低区域内人均资源拥有量，使得生产和生活空间持续扩大，而生态空间持续缩小。甘肃省人口密度上升带来的严峻资源环境形势促进GDE下降，这与程钰等[7]的研究结论相似。

产业结构q最弱，其合理化和高级化对经济效益、资源利用效率及减少对资源环境的胁迫效应意义重大。对甘肃省而言，工业以石油化工、有色金属冶炼等重工业为主，产业吸引着诸多要素流向资源型产业，需促进第三产业的发展，优化产业结构提升GDE。

(2) 绿色发展效率空间分异驱动因子交互作用探测

为进一步探究不同驱动因子间的交互作用对GDE q的变化情况，交互探测2005、2010、2015、2019年的驱动因子，探测结果(表3)表明：因子交互类型主要为双因子增强和非线性增强型。其中2005、2010、2015、2019年均出现交互作用力达到1.000的情况，说明驱动因子组合的交互作用q与甘肃省GDE空间分异上具有一致性，极强解释了甘肃省GDE空间分异程度。甘肃省GDE是多方面因素相互作用的结果。

4 讨论

本文构建甘肃省GDE指标体系，与以往研究[9,14–15]相比，将化肥折纯量纳入非期望产出指标体系中，更能体现甘肃省特色和区域普适性原则。甘肃省GDE时空分析表明，由于投入要素与政策等存在差异，各市州绿色发展在转型中所关注的要素各有侧重，进而引起区域异质性特征。此外已有研究多探讨单一或少数因子对GDE的作用机制，而本文运用地理探测器探究GDE空间分异主要控制因子以及不同因子叠加贡献率，更有利于研究各因子对GDE的影响非均质性特征。结合甘肃省GDE空间分异驱动因子探测结果表明，可从提高生态经济水平，

表3 甘肃省绿色发展效率空间分异的交互探测结果

Tab. 3 Interactive detection results of spatial differentiation of GDE in Gansu Province

因子交互	2005年		2010年		2015年		2019年	
	q	类型	q	类型	q	类型	q	类型
$X_1 \cap X_2$	1.000	NE	0.966	DE	1.000	NE	0.577	DE
$X_1 \cap X_3$	0.171	NE	0.785	DE	0.498	DE	0.577	DE
$X_1 \cap X_4$	1.000	NE	0.752	DE	1.000	DE	0.847	NE
$X_1 \cap X_5$	1.000	NE	0.688	DE	0.807	DE	0.960	NE
$X_1 \cap X_6$	0.171	NE	0.655	DE	0.451	DE	1.000	DE
$X_1 \cap X_7$	1.000	NE	0.752	DE	0.807	NE	1.000	NE
$X_2 \cap X_3$	0.112	NE	0.610	DE	0.844	DE	0.577	DE
$X_2 \cap X_4$	0.248	NE	0.884	DE	0.844	DE	0.848	NE
$X_2 \cap X_5$	0.804	NE	0.977	DE	0.682	DE	0.555	NE
$X_2 \cap X_6$	0.248	NE	0.735	DE	0.844	NE	1.000	DE
$X_2 \cap X_7$	0.804	NE	0.966	DE	0.697	DE	1.000	NE
$X_3 \cap X_4$	0.248	NE	0.634	DE	0.844	DE	0.848	NE
$X_3 \cap X_5$	0.804	NE	1.000	NE	0.844	DE	1.000	NE
$X_3 \cap X_6$	0.014	NE	0.757	NE	0.607	DE	1.000	DE
$X_3 \cap X_7$	0.471	DE	0.785	DE	1.000	NE	0.960	NE
$X_4 \cap X_5$	1.000	DE	0.931	DE	0.844	DE	0.802	NE
$X_4 \cap X_6$	0.248	DE	0.721	NE	0.837	DE	1.000	DE
$X_4 \cap X_7$	1.000	NE	0.667	DE	1.000	DE	0.406	DE
$X_5 \cap X_6$	1.000	NE	0.621	DE	0.805	DE	1.000	DE
$X_5 \cap X_7$	0.804	NE	1.000	DE	0.807	DE	1.000	NE
$X_6 \cap X_7$	0.473	DE	0.966	NE	0.228	DE	1.000	DE

注：DE为双因子增强；NE为非线性增强。

推进经济高质量发展，提高资源环境承载能力，实施山水林田湖草生态保护与修复工程；建立城市和区域循环发展体系，强化绿色发展共性技术、资源高效利用和环境污染治理等方面的技术研发；加强政府调控，注重多因素协同对绿色发展转型的驱动效应；科学和精细管控国土空间，优化“三生空间”比例，提高国土空间结构优化的可持续发展效益等方面进行绿色转型发展。

此外本研究单元为地市尺度，未来应进一步通过遥感技术快速批量获取数据与细化尺度，尝试探讨基于格网尺度的GDE测度与时空演化过程；从多维复合视角结合人地关系视角研究甘肃省GDE的驱动机制。

5 结 论

（1）时序演化方面，研究期内甘肃省GDE及其区域相对差异均呈“M”型四阶段变化趋势。2008、2012、2015年为三大转折点，各区域政策背景下，各市州实施不同的发展策略，而资源禀赋、配置效率以及发展侧重点不同，甘肃省GDE提升任重道远。

（2）空间演化方面，GDE空间分异性显著，南北方向梯度差比东西方向大。GDE得到改善，但未发生根本性变化，其中兰州市最低，甘南藏族自治州、临夏回族自治州、陇南市效率相对较高，金昌市、张掖市、嘉峪关市GDE呈上升趋势。空间集聚程度弱，主要以低热点区、中热点区和低冷点区为主，大部分区域保持着原有格局。2005年和2019年均以甘南藏族自治州为低热点区，2010年形成以兰州市和白银市为中心的低冷点区，2015年形成以金昌市为中心的中热点区，GDE存在俱乐部收敛特征。

（3）驱动因素方面，呈现区域化、动态化和复杂化特点，市场化水平、创新能力、政府调控、城镇化水平是甘肃省GDE空间分异的主导因子，城镇化水平、政府调控和创新能力q潜力大，政府调控、创新能力q呈上升趋势，贸易水平、市场化水平和人口密度q呈下降趋势。甘肃省GDE是多因素共同作用的

结果。

参考文献(References)

[1] 胡鞍钢, 周绍杰. 绿色发展: 功能界定、机制分析与发展战略[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 14-20. [Hu Angang, Zhou Shaojie. Green development: Functional definition, mechanism analysis and development strategy[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(1): 14-20.]

[2] 朱美青, 史文娇, 黄宏胜. 江西省绿色发展区划[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2687-2696. [Zhu Meiqing, Shi Wenjiao, Huang Hongsheng. Green development regionalization in Jiangxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8): 2687-2696.]

[3] 邓祥征, 金贵, 何书金, 等. 发展地理学研究进展与展望[J]. 地理学报, 2020, 75(2): 226-239. [Deng Xiangzheng, Jin Gui, He Shujin, et al. Research progress and prospect on development geography[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(2): 226-239.]

[4] 欧阳志云, 赵娟娟, 桂振华, 等. 中国城市的绿色发展评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(5): 11-15. [Ouyang Zhiyun, Zhao Juanjuan, Gui Zhenhua, et al. Evaluation of green development in cities of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 19(5): 11-15.]

[5] 中国政府网. 中共中央国务院关于加快推进生态文明建设的意见[EB/OL]. [2021-12-06]. https://www.audit.gov.cn/n4/n18/c65045/content.html. [Chinese Government Net. The Central Committee of the Communist Party of China about the State Council to accelerating the construction of ecological civilization of guidance[EB/OL]. [2021-12-06]. https://www.audit.gov.cn/n4/n18/c65045/content.html.]

[6] Feng C, Wang M, Liu G C, et al. Green development performance and its influencing factors: A global perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 144(15): 323-333.

[7] 程钰, 王晶晶, 王亚平, 等. 中国绿色发展时空演变轨迹与影响机理研究[J]. 地理研究, 2019, 38(11): 2745-2765. [Cheng Yu, Wang Jingjing, Wang Yaping, et al. A comparative research of the spatial-temporal evolution track and influence mechanism of green development in China[J]. Geographical Research, 2019, 38(11): 2745-2765.]

[8] Liu T, Li Y. Green development of China's Pan-Pearl River Delta mega-urban agglomeration[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 15717, doi: 10.1038/s41598-021-95312-z.

[9] 周亮, 车磊, 周成虎. 中国城市绿色发展效率时空演变特征及影响因素[J]. 地理学报, 2019, 74(10): 2027-2044. [Zhou Liang, Che Lei, Zhou Chenghu. Spatio-temporal evolution and influencing factors of urban green development efficiency in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(10): 2027-2044.]

[10] 郭付友, 高思齐, 佟连军, 等. 黄河流域绿色发展效率的时空演变特征与影响因素[J]. 地理研究, 2022, 41(1): 167-180. [Guo Fuyou, Gao Siqi, Tong Lianjun, et al. Spatio-temporal evolution track and influencing factors of green development efficiency in Yellow River Basin[J]. Geographical Research, 2022, 41(1): 167-180.]

[11] 赵林, 吴殿廷, 金芮合, 等. 中国省际绿色包容性效率的时空演变特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 3087-3096. [Zhao Lin, Wu Dianting, Jin Ruihe, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of inter-provincial green inclusive efficiency in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9): 3087-3096.]

[12] 郭付友, 佟连军, 仇方道, 等. 黄河流域生态经济走廊绿色发展时空分异特征与影响因素识别[J]. 地理学报, 2021, 76(3): 726-739. [Guo Fuyou, Tong Lianjun, Qiu Fangdao, et al. Spatiotemporal differentiation characteristics and influencing factors of green development in the eco-economic corridor of the Yellow River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(3): 726-739.]

[13] Wu J, Lu W, Li M J. A DEA-based improvement of China's green development from the perspective of resource reallocation[J]. Science of the Total Environment, 2020, 717(3): 137106, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137106.

[14] 车磊, 白永平, 周亮, 等. 中国绿色发展效率的空间特征及溢出分析[J]. 地理科学, 2018, 38(11): 1788-1798. [Che Lei, Bai Yongping, Zhou Liang, et al. Spatial pattern and spillover effects of green development efficiency in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(11): 1788-1798.]

[15] 岳立, 薛丹. 黄河流域沿线城市绿色发展效率时空演变及其影响因素[J]. 资源科学, 2020, 42(12): 2274-2284. [Yue Li, Xue Dan. Spatiotemporal change of urban green development efficiency in the Yellow River Basin and influencing factors[J]. Resources Science, 2020, 42(12): 2274-2284.]

[16] Yuan W H, Li J C, Meng L, et al. Measuring the area green efficiency and the influencing factors in urban agglomeration[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 241: 118092, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118092.

[17] 曹乃刚, 赵林, 高晓彤. 黄河三角洲县域绿色经济效率的时空演变与驱动机制[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3299-3310. [Cao Naigang, Zhao Lin, Gao Xiaotong. Spatiotemporal evolution and driving mechanism of green economic efficiency at county level in the Yellow River Delta, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(9): 3299-3310.]

[18] Zhang N, Deng J Q, Ahmad F, et al. Local government competition and regional green development in China: The mediating role of environmental regulation[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(10): 3485, doi: 10.3390/ijerph17103485.

[19] Zhu B Z, Zhang M F, Zhou Y H, et al. Exploring the effect of industrial structure adjustment on interprovincial green development efficiency in China: A novel integrated approach[J]. Energy Policy, 2019, 134: 110946, doi: 10.1016/j.enpol.2019.110946.

[20] Zhang Q, Yan F H, Li K, et al. Impact of market misallocations on green TFP: Evidence from countries along the Belt and Road[J].

Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(34): 35034-35048.

[21] 伍光和, 江存远. 甘肃省综合自然区划[M]. 兰州: 甘肃科技出版社, 1998. [Wu Guanghe, Jiang Cunyuan. Integrated natural division in Gansu Province[M]. Lanzhou: Gansu Province Science and Technology Press, 1998.]

[22] 史玉芳, 兰欣颐. 中部地区资源型城市绿色发展效率的空间网络结构研究[J]. 统计与信息论坛, 2021, 36(10): 86-98. [Shi Yufang, Lan Xinyi. Research on spatial network structure of green development efficiency of resource-based cities in Central China[J]. Statistics & Information Forum, 2021, 36(10): 86-98.]

[23] 陈阳, 唐晓华. 制造业集聚和城市规模对城市绿色全要素生产率的协同效应研究[J]. 南方经济, 2019(3): 71-89. [Chen Yang, Tang Xiaohua. Study on the synergistic effect of manufacturing agglomeration and urban size on urban green total factor productivity [J]. South China Journal of Economics, 2019(3): 71-89.]

[24] 林晓, 徐伟, 杨凡, 等. 东北老工业基地绿色经济效率的时空演变及影响机制——以辽宁省为例[J]. 经济地理, 2017, 37(5): 125-132. [Lin Xiao, Xu Wei, Yang Fan, et al. Spatiotemporal characteristics and driving forces of green economic efficiency in old industrial base of northeastern China: A case study of Liaoning Province[J]. Economic Geography, 2017, 37(5): 125-132.]

[25] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1): 32-41.

[26] 胡雪瑶, 张子龙, 陈兴鹏, 等. 县域经济发展时空差异和影响因素的地理探测——以甘肃省为例[J]. 地理研究, 2019, 38(4): 772-783. [Hu Xueyao, Zhang Zilong, Chen Xingpeng, et al. Geographic detection of spatial-temporal difference and its influencing factors on county economic development: A case study of Gansu Province[J]. Geographical Research, 2019, 38(4): 772-783.]

[27] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[28] 李晋红, 朱学昱. 基于DEA-Malmquist指数模型的绿色发展效率测度与评价——以甘肃省为例[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(8): 184-191. [Li Jinhong, Zhu Xueyu. Measurement and evaluation of green development efficiency based on DEA-Malmquist index model: Taking Gansu Province as an example[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(8): 184-191.]

[29] 郭付友, 陈才, 刘志刚. 城市绿色发展效率的空间分异及影响因素——基于山东省17地市面板数据[J]. 世界地理研究, 2020, 29(5): 1040-1048. [Guo Fuyou, Chen Cai, Liu Zhigang. Evaluation and influence factors of green development efficiency: Based on panel data of 17 cities in Shandong Province[J]. World Regional Studies, 2020, 29(5): 1040-1048.]

[30] 张军民, 荣城, 马玉香. 新疆城镇化绿色发展时空分异及驱动因子探究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 251-262. [Zhang Junmin, Rong Cheng, Ma Yuxiang. Spatial and temporal differences and driving factors of the green development of urbanization in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 251-262.]

Spatiotemporal evolution and driving factors of the green development efficiency in Gansu Province

LU Chenyu[1,2], HUANG Ping[1], ZHANG Tong[1], LIU Xiaowan[2], CHENG Wei[1]

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. School of Architecture and Urban Planning, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Improving the green development efficiency (GDE) is crucial for constructing ecological civilization and high-quality development in Gansu Province, China. Based on the Super-SBM model, hotspot analysis and the geographic detector model, Gansu Province from 2005 to 2019 was analyzed for the spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of the GDE in 14 cities and prefectures. The following results are obtained: (1) Temporally, the GDE shows a pattern of "M"-shaped fluctuated growth, and the regional relative difference demonstrates a corresponding trend of fluctuation. (2) Spatially, the spatial heterogeneity of the GDE is significant, and the gradient difference in the north-south direction is significantly greater than that in the east-west direction. However, the degree of spatial agglomeration of the GDE is weak, dominated by low hot-spots, middle hot-spots, and low cold-spots. Additionally, the GDE displays a characteristic of spatial club convergence. (3) Marketization level, innovation ability, government regulation, and urbanization level are the driving factors of GDE. The GDE in Gansu Province is the result of the multifactor interaction. The results not only enrich the index system and case study of GDE but also can provide references for the green transformation development of Gansu Province and other less developed areas.

Key words: green development efficiency; the Super-SBM model; the geographic detector model; Gansu Province